

УДК 532.5-1/-9

ФОРМУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ВИХРОВИХ СТРУКТУР У ВУЗЬКОМУ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОМУ КАНАЛІ З ЗАГЛИБЛЕННЯМИ

Д. М. Стребкова^{1, a}, Н. Ф. Димитрієва^{1,2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут гідромеханіки Національної академії наук України

Анотація

У даній роботі наведено результати комп'ютерного моделювання формування тривимірних вихрових систем в вузькому плоскопаралельному каналі з 2-ма заглибленнями типу усіченної піраміди, які виконують функцію генератора вихорів в турбулентній течії. Значення чисел Рейнольдса, для яких проводився розрахунок – $Re = 50 ; 3 \cdot 10^3$. Проведено аналіз просторового розподілу та еволюції системи вихорів різних масштабів та порівняння результатів для ламінарної та турбулентної течій за допомогою чисельного експерименту.

Ключові слова: заглиблення, вузький канал, комп'ютерне моделювання, турбулентна течія, вихрова структура

Вступ

У представленій роботі чисельним методом досліджуються закономірності формування тривимірних вихрових систем в плоскопаралельному каналі з заглибленнями типу усіченою перапіди, що виконують функцію генератора вихорів в турбулентній течії.

Визначення ефективності руху тіл при заданій швидкості з мінімумом енергетичних втрат, що пов'язане з мінімізацією опору тертя при заданій швидкості та заданого об'єму тіл – це одне з актуальних питань у сучасній аеро та гідромеханіці. Гідродинамічний опір тіл, які рухаються в суцільному середовищі, або гідравлічний опір у внутрішніх течіях визначаються режимом течії. Керування примежовим шаром генерацією вихорів нав'язує турбулентній течії детерміновану вихрову структуру заданого масштабу та інтенсивності, яка може призводити до зменшення швидкості наростання товщини примежового шару вниз за течією та підтримувати енергетичний баланс між пульсаційним полем і осередненою течією. Під час відриву вихорів з гострих кромek вихорогенераторів, в примежовий шар обтічного тіла або в відривну течію генеруються досить стійкі повздовжні вихори, які описані у [1], [2]. Основним недоліком таких вихорогенераторів є їх високий опір форми.

Разом з питаннями зниження гідродинамічного опору у величезній кількості технічних пристроїв, проблема теплообміну з навколишнім середовищем є не менш важливою. Тому ефективність методів керування пристінними течіями оцінюється комплексним параметром, в якому враховується як ефект зміни теплообміну, так і гідродинамічного опору, що показано у [3]. І якщо раніше збільшення теплообміну

завжди зв'язувалося із збільшенням опору, то дослідження останніх десятиліть показали, що вихрові системи, що генеруються заглибленнями на поверхні, можуть істотно підвищити теплообмін, при цьому гідродинамічний опір зростає неістотно. Більш того, на резонансних режимах опір практично відповідає опору плоскій гладкій поверхні.

Так, для інтенсифікації конвективного теплообміну в газотурбобудуванні і теплоенергетиці використовують неглибокі канавки і поздовжні, поперечні, похилі низькі ребра. Якщо поздовжні ребра тільки збільшують поверхню теплообміну, то їх поперечні і похилі варіанти більш ефективні. Генерацією відривних і течій, що приєднуються з оновленням прикордонного шару, вони ще й інтенсифікують конвективний теплоперенос в пристінній течії.

Вузькі канали представляють інтерес, так як їх застосовують для транспорту наночастинок, бактерій, молекул ДНК, охолодження мікроелектронних пристроїв, в якості хімічних реакторів для мікроскопічних кількостей речовини. Можна перерахувати такі переваги міні і мікрмасштабного обладнання:

- Високі коефіцієнти теплопередачі (до 20 кВт/м^2);
- Надзвичайно малий час перебування, обумовлений малим об'ємом апарату (10^{-3} с і менше);
- Збільшення питомої поверхні ($10000 - 50000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, в звичайних – не більше $1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$);
- Різке збільшення поперечних градієнтів температури і концентрації (за рахунок зменшення поперечних розмірів каналів);
- Інтенсифікація масопереносу в гетерогенних середовищах (циркуляційніт перемішування в Тейлоровському режимі);
- Різке зменшення габаритів апаратів, зниження металоемності;

^adiana1707str@gmail.com

Але проста оцінка показує, що зменшення характерних розмірів ζ системи і діаметра a мікрокрапель призводить до домінування поверхневих сил. Дійсно, в цьому випадку відношення поверхневих сил F_{surf} (капілярний тиск або в'язкі напруження) до об'ємних сил F_{vol} пропорційно відношенню площі поверхні S до елементу обсягу рідини V , на які ці сили діють, $F_{surf}/F_{vol} \sim S/V \sim (\zeta)^{-1} \xrightarrow{\zeta \rightarrow 0} \infty$.

Це призводить до ряду особливостей:

- високий гідродинамічний опір;
- домінування капілярних сил в багатокомпонентних середовищах;
- сильний вплив стінок каналу на деформаційну поведінку і граничні характеристики дисперсійної фази (ефекти конфайнмента).

Тому, для вивчення гідродинамічних та теплофізичних властивостей течії було прийнято рішення побудувати модель та зробити чисельний розрахунок вузького каналу з заглибленнями. Бульше інформації можна знайти в [4].

1. Математична модель

В якості середовища розглядається повітря, але за малих чисел Маха $M < 0.4$, воно може описуватись як нестисливе середовище. Тому в якості математичної моделі поставленої задачі вибрано усереднене по швидкостям рівняння Нав'є-Стокса для нестисливого середовища та рівняння нерозривності.

Для чисел Маха даної задачі, повітря гарно описується моделлю нестисливої рідини, яка і була обрана для спрощення розрахунку.

1.1. Система визначальних рівнянь

Вихідні рівняння – рівняння Рейнольдса для нестисливої рідини і рівняння нерозривності.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(v \nabla) v + \nu \Delta v - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1)$$

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (2)$$

де v – поле швидкостей, p – поле тиску, ρ – густина.

Система рівнянь Рейнольдса містить десять невідомих і чотири рівняння для тривимірного випадку. Таким чином, вона являється незамкненою. Для її розв'язку доводиться залучати додаткові напівемпіричні гіпотези – моделі турбулентності. Використовується тип моделювання турбулентності – Reynolds-averaged simulation (RAS). Модель турбулентності – $k - \varepsilon$.

Модель турбулентності $k - \varepsilon$ заснована на розрахунку двох параметрів турбулентності: k – кінетична енергія турбулентних пульсацій, ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій, значення яких визначаються шляхом вирішення відповідних диференціальних рівнянь переносу. Стандартна модель турбулентності $k - \varepsilon$ побудована на припущенні про повністю розвинену турбулентну течію. Для коректного розрахунку примежового шару,

де проявляють себе в'язкі ефекти, модель турбулентності $k - \varepsilon$ включає в себе пристінкову функцію, яка містить універсальний профіль швидкості і зв'язує параметри течії з відстанню від стінки.

1.2. Граничні умови

Для розв'язку до рівнянь необхідно додати граничні умови для 4-х полів: двох основних p, v і двох додаткових для рівнянь турбулентності k, ε . Для поля швидкості задані умови плоского сталого профілю на вході і умова прилипання на стінках $v = 0$. Тиск задається сталим на виході з каналу. Для k, ε на стінці функцію граничної умови виконує спеціальні пристінкові функції. Останньою необхідною умовою є задання поля k на вході в систему. Для оцінки був використаний зв'язок між кінетичною енергією турбулентності і ступіню турбулентності I .

$$k = \frac{3}{2} (Iv)^2 \quad (3)$$

Де параметр I може бути оцінений як

$$I = 0.16 Re^{-1/8} \quad (4)$$

2. Чисельне моделювання

Для розрахунку самих рівнянь використовувся пакет OpenFoam. В основі пакету лежить метод скінченних об'ємів. Для побудови сітки використовувся безкоштовний пакет програм SALOME. Для візуалізації розрухануків використовувся ParaView. Інтеграли по контрольному об'єму зводяться до поверхневого методом Гаусса, а значення функції на поверхні комірки інтерполюється із значень функції в центроїдах сусідніх комірок. Робочою мовою коду є об'єктноорієнтована мова програмування C++, в термінах якого більшість математичних диференціальних і тензорних операторів в програмному коді рівнянь може бути представлена в зрозумілій формі, а метод дискретизації та розв'язку для кожного оператора може бути обраний вже користувачем в процесі розрахунку.

Для розрахунку був використаний персональний комп'ютер. Під час розрахунку фіксувалось значення числа Куранта.

$$Co = \frac{v \Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

де Δx – характерний розмір сітки, Δt – крок по часу, v – швидкість течії.

Було розраховано 1 с для швидкості 30 м/с та 3 с для швидкості 0.01 м/с, що зайняло близько 3 годин реального часу без розпаралелювання.

2.1. Розрахункова сітка

Досліджується плоскопаралельний вузький канал розмірами 32 : 10 : 4 мм з 2 виїмками типу усіченої піраміди. В зв'язку зі складною формою геометрії було вирішено не розбивати її на блоки, а скористатися алгоритмом NetGen і побудувати одноблочну сітку з тетрагональним розбиттям (рис. 1). Для зв'язаного

розрахунку поля швидкості і тиску використовувався стійкий алгоритм PIMPLE. Він показав високу ефективність для нестационарних задач.

Для наочності були зняті лінії течії в каналі через 0.1 с після подачі рідини, коли профіль швидкості вже встановився. Процес утворення вихрової структури у першій та другій лунці показан на рис. 3а, 3б

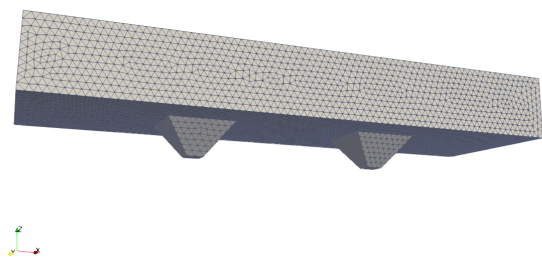


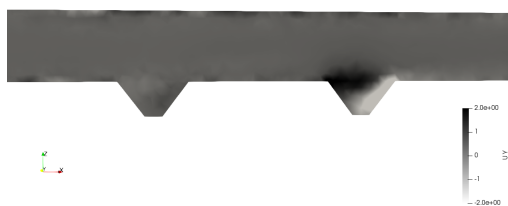
Рис. 1. Тетрагональна сітка

3. Результати

Для швидкості 30 м/с були розраховані поля тиску, швидкості, завихреності та ін. Після встановлення профілю швидкості (0.001) були зняті поперчні та продольні поля швидкостей, де цікавість представляє компонента швидкості v_y (рис. 2а, 2б)



(а) Повздовжнє поле швидкості v_y

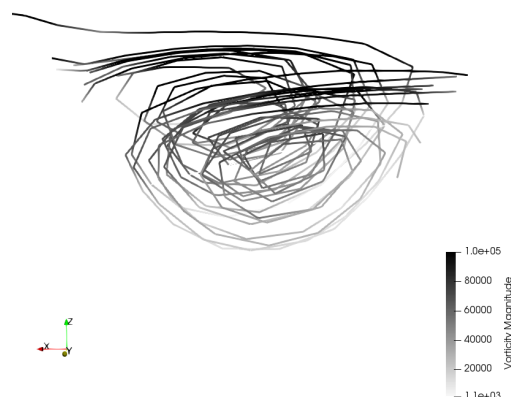


(б) Поперечне поле швидкості v_y

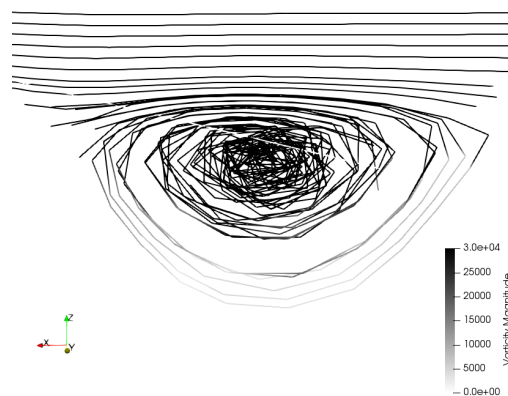
Рис. 2. Поля швидкості v_y

З рис. 2а, 2б чітко можна побачити утворення вихрових структур, які прослідковуються після обох заглиблень. Саме ці вихрові структури покращують переміщення рідини по ширині каналу. Також видно, що сформувався стійкий профіль швидкостей, закономірно в сліді за виїмкою швидкість менша, а в самому заглибленні протилежно направлена, що пояснюється утворенням вихрових структур.

Можно побачити, що вихроутворення в першому заглибленні впливає на процес вихроутворення в другому заглибленні, де швидкість значно більша.



(а) Вихрова структура у першій лунці



(б) Вихрова структура у другій лунці

Рис. 3. Лінії течії в повздовжньому перерізі

Для подальшого дослідження в зону одразу після першого заглиблення була «Встановлена» пробна точка, в якій вимірювався тиск, завихреність, енергія турбулентності і т.д. Виміри тиску з часом представлені на рис. 4

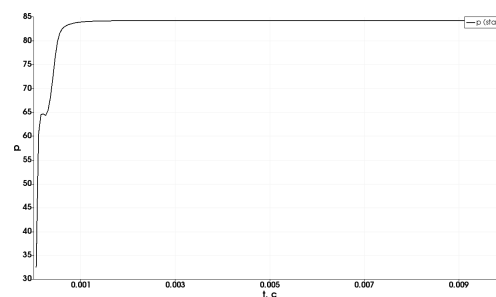


Рис. 4. Еволюція тиску в пробній точці з часом

Різкі скачки в профілі тиску пояснюються періодичними викидами вихрів, після чого графік рівномірно виходить на намінальне значення через поступовий вплив стінок каналу.

Для зрівняння утворених вихрових структур була побудована така ж модель зі швидкістю $v = 0.01$ м/с. Вимірювання гідродинамічних величин в пробних точках не дали цікавих результатів, профіль швидкості залишався постійним, а утворений вихр майже одразу розвіявся. Лінії течії представлені на рис. 5. Можно побачити, що загальний вид течії залишається постійним, а друге заглиблення зовсім не впливає на розвиток по току.

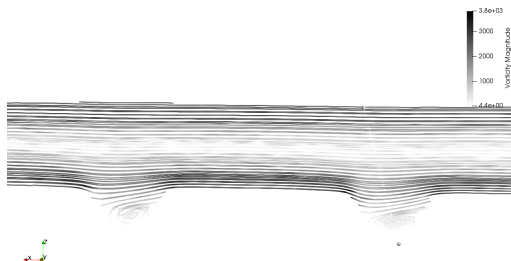


Рис. 5. Лінії течії в момент часу 1 с при швидкості 0.01 м/с

Висновки

В зоні більш високих чисел Рейнольдса $Re = 3000$ утворюються великі вихрові структури, які вплива-

ють на швидкість потоку, покращуються перемішування по ширині каналу та позначаються на середньому тиску по каналу. В той же час при меншій швидкості, коли $Re = 50$, виїмки майже не впливають на загальний вид потоку та профіль швидкості.

Перелік використаних джерел

1. Воропаєв Г. О. Дослідження закономірностей формування вихрової структури турбулентних пристінних течій на неоднорідних поверхнях. — Київ : Звіт про науково-дослідну роботу, 2014. — С. 21–40.
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). — Киев : НАН Украины, Институт технической теплофизики, 2005. — Т. 10. — С. 76.
3. Quake S. R. Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. — 2006.
4. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах. — Москва : М.: Машиностроение, 1990. — С. 273.